

·油气采收率·

基于均衡驱替的分段注水层段划分及合理配注方法

崔传智,刘力军*,丰雅,武改红,陈鸿林,金超林

(中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580)

摘要:分层注水是减少层间干扰、缓解层间矛盾的重要手段,对于纵向层系较多的油藏来说,将储层物性相近的若干层组合,实施分段注水是现场常用且有效的措施。以层间吸水指数级差为注水层段划分指标进行层段划分;根据Buckley-Leverett非活塞式水驱油理论,以实现均衡驱替为目标,建立分段配注量的计算方法,编制计算程序,并用数值模拟模型进行验证。计算结果表明:以层间吸水指数级差作为注水层系分段指标具有科学性;各段配注量分布受储层物性、调控时间、剩余油饱和度影响;调控时间越长,各段间单位厚度配注量差异越小,达到均衡时的含水饱和度越高;段内平均含水饱和度越大,单位厚度配注量越小;层间吸水指数越大,单位厚度配注量越小。

关键词:多层油藏 分段注水 层段划分 最优分割法 均衡驱替

中图分类号:TE341

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)04-0067-05

Layer classification and rational sectional water injection allocation method based on equilibrium displacement

Cui Chuanzhi, Liu Lijun, Feng Ya, Wu Gaihong, Chen Honglin, Jin Chaolin

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China)

Abstract: Separate layer water injection is an effective measure to weaken interlayer interference and alleviate the interlayer inconsistency. Sectional water injection is a common approach used in reservoirs with multi-layer in the vertical by combining layers with similar physical properties. The layers were classified according to the differential absorption index as the dividing standard. Based on Buckley-Leverett displacement theory, the method of calculating the water allocation of each section was established to achieve equilibrium displacement. Calculation program was made and verified by numerical simulation model. The result shows that the differential absorption index is a scientific dividing standard, and the injected water distribution is influenced by reservoir physical property, residual oil saturation and adjusting time. As the extension of adjusting time, the difference of injected water quantity between sections becomes smaller and the water saturation rises when the equilibrium reaches. Larger average water saturation in sections brings smaller water allocation for unit thickness. With the increase of differential absorption index, the required quantity of water for unit thickness decreases gradually.

Key words: multi-layer reservoir; sectional water injection; layer classification; optimum allocation method; equilibrium displacement

中国东部油田绝大多数为陆相沉积地层,纵向层系多,层间非均质性强。在长期注水开发过程中,由于储层物性的差异,层间矛盾越来越突出,导致油井提前见水。分段注水的关键是注水层段的

合理划分及各段配注量的确定,目前中外对分段注水层段划分方法的研究较少,配注量的计算主要依据静态参数,或以矿场经验为主。李丹对分段注水井逐级解封技术进行了研究,解决了多层段细分注

收稿日期:2017-03-22。

作者简介:崔传智(1970—),男,山东青州人,教授,博士,从事油气渗流理论、油气田开发技术方面的研究与教学工作。联系电话:13705469592, E-mail:ccz2008@126.com。

*通讯作者:刘力军(1992—),女,山东聊城人,在读硕士研究生。联系电话:18353248625, E-mail:ljklzh@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“胜利油田特高含水期提高水驱采收率技术”(2016ZX05011-002)。

水问题^[1];杜庆龙基于井间非均质性的渗流阻力计算方法,对注水井分层注入量、生产井分层产油量进行计算^[2];高大鹏等建立了洛伦兹曲线模型,综合考虑了分段结构、配水方案等对注水效果的影响^[3]。目前,对于配注量的计算方法有阻力系数法、劈分系数法和剩余油饱和度法等^[4-9],这些方法有的考虑参数较多,难以量化计算,且未将动用情况与段间均衡性相结合。为此,笔者在Buckley-Leverett非活塞式水驱油理论的基础上,研究了以实现段间均衡驱替为目标的配注量计算方法,以期对直井分段注水的配注提供依据。

1 分段注水层段划分方法

1.1 分段指标及政策界限

储层吸水能力的差异直接影响水驱开发效果,当高、低渗透层合采时,流体通常会沿着高渗透层突进,低渗透层吸水很少甚至不吸水,导致剩余油在低渗透层富集,且这种矛盾随开发的进行越来越突出,因此,将层间吸水指数级差作为划分层段的指标具有科学性^[10]。

由吸水指数的定义可知,吸水指数为渗流阻力的倒数,其表达式为

$$J = \frac{1}{R_w + R_{wo} + R_o} = \frac{1}{\frac{\mu_w L_w}{K_{rw} KBh} + \frac{L_{wo}}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w}\right) KBh} + \frac{\mu_o L_o}{K_w KBh}} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,吸水指数与储层渗透率、流体粘度、有效厚度和含油条带宽度等参数有关,该指标综合考虑了开发过程中动、静态因素的影响。

崔传智等通过数值模拟研究发现,当层间吸水指数级差大于4.5时,采出程度迅速下降^[10]。为此,将层间吸水指数级差为4.5作为划分注水层段的政策界限,当层间吸水指数级差大于4.5时,不能将其划为同一段。

1.2 层段划分方法

综合考虑工艺要求和经济因素,通常将物性相近的小层划分为一段,确保每段内至少包含1个小层,且层间吸水指数级差小于4.5。采用插板法对各分段方案进行计算,步骤如下:①在目前生产状况下,计算各小层的吸水指数。②按照段内小层相邻的原则,将所有小层看成是有序排列的队列,即将 M 个小层划分为 N 段,则有 C_{M-1}^N 种插板方案。根据

有序样品聚类原理,利用最优分割算法^[11],计算所有方案下的层间吸水指数级差,优选出所有层间吸水指数级差均小于4.5的方案,若没有符合条件的方案,则选择层间吸水指数均值最小的方案作为划分为 N 段时的最优方案;若有多种符合条件的方案,则进行二次筛选,降低层间吸水指数级差标准值,依次类推,直至筛选出各段内储层物性最均匀的方案。③按照步骤②描述的方法,编制计算程序,筛选出分2,3,4和5段时的最优方案,进行注水效果对比,优选出最优分段方案。

2 各段配注量优化计算方法

分段注水的目的在于缓解层间矛盾,减少层间干扰,最终实现均衡驱替,通过调配注水井到各段的水量,使各段的剩余油饱和度(或出口端含水饱和度)相同。据Buckley-Leverett非活塞式水驱油理论,由出口端含水饱和度反推累积配注量,在恒速注水的情况下得到平均配注量^[12-13]。假设给定井的总配注量,通过确定一定时间内各段的出口端含水饱和度,使计算的各段配注量之和等于总配注量,此时各段配注量即为实现均衡驱替时的配注量。

2.1 出口端含水饱和度计算方法

在注水开发过程中,由于高、低渗透层间的差异,有的高渗透层已见水,而低渗透层未见水,据此,将未见水小层分为纯水区、油水两相区和纯油区,将已见水小层分为纯水区和油水两相区。

2.1.1 未见水小层

对于未见水小层,出口端含水饱和度等于水驱前缘含水饱和度,因此关键在于计算油水前缘位置和前缘含水饱和度,根据各小层注采数据及储层参数,可计算各小层的平均含水饱和度,其表达式为

$$\bar{S}_{wi} = \frac{(1 - S_{or})x_{wi} + \bar{S}_{woi}x_{fi} + S_{wc}(L - x_{wi} - x_{fi})}{L} \quad (2)$$

将式(2)变形可得各小层的油水前缘位置,其计算式为

$$x_{fi} = L - x_{wi} - \frac{\bar{S}_{wi}L - (1 - S_{or})x_{wi} - S_{wc}(L - x_{wi})}{S_{wc}} \quad (3)$$

在分段注水时,驱替前缘位置为各小层油水前缘距离对厚度的加权平均值,故第 j 段的平均驱替前缘位置为

$$x_{fj} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i x_{fi}}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (4)$$

2.1.2 已见水小层

对于已见水小层,段内第*i*小层油水两相区的平均含水饱和度为

$$\bar{S}_{woi} = \frac{S_{w2i} f'_w(S_{w2i}) + [1 - f_w(S_{w2i})]}{f'_w(S_{w2i})} \quad (5)$$

段内第*i*小层出口端的含水饱和度^[14]为

$$S_{w2i} = \bar{S}_{woi} - \frac{1 - f_w(S_{w2i})}{f'_w(S_{w2i})} \quad (6)$$

第*j*段平均出口端含水饱和度为段内各小层出口端含水饱和度对厚度的加权平均,其计算式为

$$\bar{S}_{w2j} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{w2i} h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (7)$$

2.2 以均衡驱替为目标的配注量计算方法

2.2.1 未见水小层

根据 Buckley-Leverett 非活塞式水驱油理论,对于未见水小层,在 Δt 内第 *j* 段出口端含水饱和度从 S_{wj} 增至 S_{w2j} 所需要的累积配注量^[14]表达式为

$$\int_0^{T_j} Q_j dt = \frac{x_j \phi A}{f'_w(S_{wj})} \quad (8)$$

在单位时间内配注量保持恒定的情况下,可以求得平均配注量,其表达式为

$$\bar{Q}_j = \frac{\phi A}{\Delta t} \left[\frac{L}{f'_w(S_{w2j})} - \frac{x_j}{f'_w(S_{wj})} \right] \quad (9)$$

2.2.2 已见水小层

对于已见水的小层,在 Δt 内第 *j* 段出口端含水饱和度从 S_{wj} 增至 S_{w2j} 所需要的累积配注量表达式为

$$\int_{T_1}^{T_1 + \Delta t} Q_j dt = \frac{L\phi A}{f'_w(S_{w2j})} - \frac{L\phi A}{f'_w(S_{wj})} \quad (10)$$

假设在 Δt 内,各段的配注量保持恒定,根据式(10)可求得第 *j* 段的平均配注量为

$$\bar{Q}_j = \frac{L\phi A}{\Delta t} \left[\frac{1}{f'_w(S_{w2j})} - \frac{1}{f'_w(S_{wj})} \right] \quad (11)$$

2.2.3 各段最小配注量计算

分段注水能够缓解层间干扰所带来的高、低渗透层间的矛盾,但由于段内各小层间渗透率、含水饱和度等的差异,在段内仍然存在一定的层间干扰,因此分段注水不能完全消除层间干扰。考虑启动压力梯度,当注采压差大于渗透率最小层的启动压力时,段内各小层均能够有效动用。

各小层吸水量表达式为

$$Q_i = J_i(\Delta p - G_i L_i) \quad (12)$$

其中

$$G_i = 0.656 3K^{-1.1056} \times \frac{S_{w\max} - S_{wi}}{S_{w\max} - S_{wc}} \quad (13)$$

各小层均能动用的条件为

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{Q_{\min} + \sum_{i=1}^n J_i G_i}{\sum_{i=1}^n J_i} > G_{\max} \quad (14)$$

段内最小配注量为

$$\begin{cases} Q_{\min} > LG_i J_i & i = 1 \\ Q_{\min} > L \left(G_{\max} \sum_{i=1}^n J_i - \sum_{i=1}^n J_i G_i \right) & i > 1 \end{cases} \quad (15)$$

2.3 模型求解

在总配注量保持恒定的条件下,合理分配各段的配注量是模型求解的关键。对于未见水小层,出口端含水饱和度等于前缘含水饱和度,根据式(4)计算各段的平均驱替前缘位置;对于已见水小层,根据式(7)计算各段出口端平均含水饱和度,该式为隐函数,采用迭代方法进行求解;利用式(9)和式(11)分别计算未见水段和已见水段的平均配注量,由于实现均衡驱替时出口端含水饱和度未知,采用迭代试算的方法进行求解,当满足各段配注量之和等于井的总配注量时,计算所得的配注量即为实现均衡驱替的配注量,迭代结束,具体求解流程如图1所示。

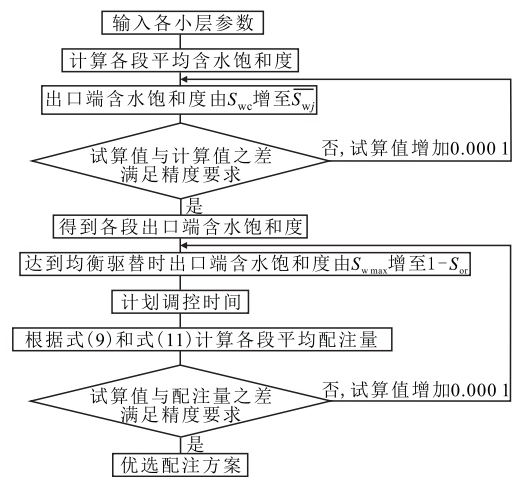


图1 分段注水模型求解流程

Fig.1 Solving flow chart of sectional water injection

3 实例计算与结果分析

胜利油区东辛油田经过多年开发,已进入高含水期,在开发过程中暴露的最大问题就是多层合注合采造成的动用不均衡,为此对该区块进行分段注

水均衡驱替研究。根据目前生产状况下各小层参数,以层间吸水指数级差为指标,进行最优层段划分,划分结果如图2所示;根据分段结果,按有效厚度进行加权平均,计算各段的渗透率、出口端平均含水饱和度。由各段计算结果(表1)可以看出,层间吸水指数级差均小于4.5,且均小于2,说明段内各小层吸水能力较为接近,划分结果具有科学性。

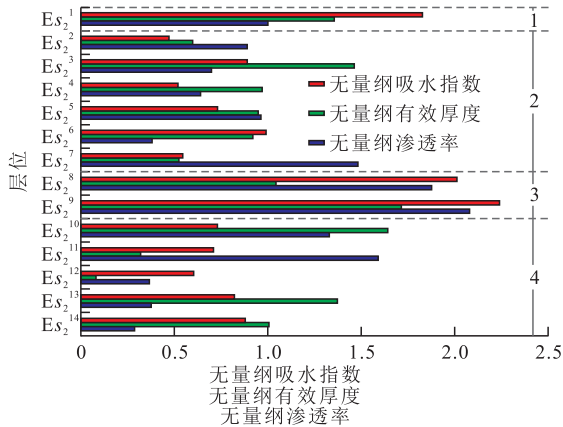


图2 东辛油田沙二段各小层参数及注水层段划分结果

Fig.2 Layer properties and result of classification in Es₂ of Dongxin oilfield

表1 东辛油田沙二段注水层段划分结果

Table1 Result of layer classification in Es₂ of Dongxin oilfield

分段编号	层位	有效厚度/m	渗透率/ μm^2	吸水指数级差	出口端含水饱和度
1	Es ₂ ¹	11.53	0.587 0	1	0.533 0
2	Es ₂ ² —Es ₂ ⁷	46.12	0.627 2	1.899 3	0.526 4
3	Es ₂ ⁸ —Es ₂ ⁹	23.43	1.563 1	1.113 8	0.551 2
4	Es ₂ ¹⁰ —Es ₂ ¹⁴	37.52	0.637 3	1.456 5	0.539 6

假设单井配注量为200 m³/d,利用式(9)一式(11)计算不同调控时间下各段配注量及各段单位厚度配注量。计算结果(表2)表明:单位厚度配注量受目前含水饱和度影响较大,调控前含水饱和度越小,单位厚度配注量越大;各段配注量受调控时间影响较大,当调控时间少于2.9 a无法实现均衡驱替;当调控时间为2.9和5 a时,段间最大与最小单位厚度配注量分别相差0.774 7和0.442 3 m³/(d·m),说明调控时间越短,为实现均衡驱替,单位厚度配注量差异越大。

表2 东辛油田沙二段分段注水调控计算结果

Table2 Calculation results of sectional water injection control in Es₂ of Dongxin oilfield

分段编号	调控时间为2.9 a		调控时间为5 a	
	配注量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	单位厚度配注量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	配注量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	单位厚度配注量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$
1	19.632 7	1.702 8	19.072 7	1.654 2
2	91.492 7	1.983 8	86.040 3	1.865 6
3	28.329 9	1.209 1	33.347 8	1.423 3
4	60.538 3	1.613 5	61.539 2	1.640 2

注量差异越大。

根据研究区块各小层数据建立地质模型,对新建方法进行验证,在目前情况下分别实施笼统注水与分段注水,生产5 a,对比两者剩余油分布(图3)可以看出,1—4段笼统注水出口端平均含油饱和度分别为31.03%,36.61%,30.84%和34.25%,分段注水出口端平均含油饱和度分别为41.36%,40.19%,40.34%和40.63%,说明实施分段注水能够有效缓解各段间矛盾,减缓高渗透层的突进,基本实现了均衡驱替。表明新建方法准确、有效。但由于分段注水时仍然存在段内小层间的干扰,因此无法实现绝对的均衡驱替。

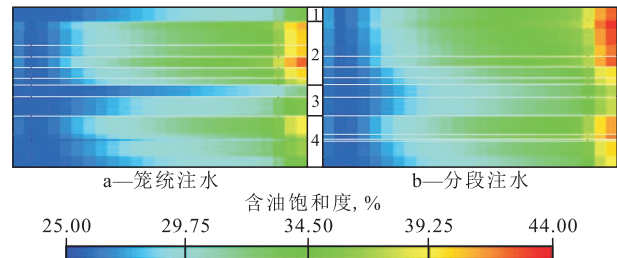


图3 东辛油田沙二段笼统注水和分段注水剩余油分布

Fig.3 Oil saturation distributions of general and sectional water injection in Es₂ of Dongxin oilfield

4 结论

注水开发效果受油藏动、静态参数的综合影响,以层间吸水指数级差作为层段划分的指标,综合考虑了储层渗透率、流体粘度、小层厚度、含油条带长度及剩余油饱和度的影响,具有科学性。数值模拟结果表明,将层间吸水指数级差为4.5作为注水层段划分的政策界限。

以均衡驱替为目标,利用Buckley-Leverett非活塞式水驱油理论计算各段配注量,综合考虑储层物性和目前动用状况。因各段剩余油的动用差异,调控前段内含水饱和度越小,单位厚度配注量越大;调控时间越短,各段间单位厚度配注量差异越大。

由于段内仍然存在一定的物性差异,因此分段注水不能从根本上消除层间干扰,分段注水应遵循先缓解矛盾较为突出的段间矛盾,再解决层间矛盾的开发思想。

符号解释:

J ——吸水指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$; R_w, R_{w0}, R_o ——纯水区、油水两相区、纯油区的渗流阻力, $\text{MPa} \cdot \text{d}/\text{m}^3$; μ_w, μ_o ——地层水、地层原油粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; L_w, L_{w0}, L_o ——纯

水区、油水两相区、纯油区的条带宽度, m ; K_w , K_o ——水、油的相对渗透率; K ——绝对渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; B ——油藏宽度, m ; h ——有效厚度, m ; S_{wi} ——第 i 小层的含水饱和度; i ——段内小层编号; S_{or} ——残余油饱和度; x_{wi} ——第 i 小层边水宽度, m ; S_{woi} ——第 i 小层油水两相区的含水饱和度; x_{fi} ——第 i 小层的驱替前缘位置, m ; S_{wc} ——束缚水饱和度; L ——注采井距, m ; j ——分段编号; x_{fj} ——第 j 段的驱替前缘位置, m ; n ——段内小层数; h_i ——段内第 i 小层的有效厚度, m ; S_{w2i} ——段内第 i 小层出口端的含水饱和度; f_w ——含水率; S_{w2j} ——注水 Δt 时间后第 j 段的出口端含水饱和度; Δt ——时间步长, d ; S_{wj} ——调控前第 j 段的出口端含水饱和度; T_1 ——调控开始时间, d ; Q_j ——第 j 段的配注量, m^3/d ; t ——调控时间, d ; ϕ ——孔隙度; A ——渗流截面积, m^2 ; S_{wfj} ——第 j 段的前缘含水饱和度; Q_i ——第 i 小层的吸水量, m^3/d ; J_i ——第 i 小层的吸水指数, $m^3/(d \cdot MPa)$; Δp ——注采压差, MPa ; G_i ——第 i 小层的启动压力梯度, MPa/m ; L_i ——第 i 小层的条带宽度, m ; Q_{min} ——段内最小配注量, m^3/d ; G_{max} ——段内最大启动压力梯度, MPa/m 。

参考文献:

- [1] 李丹.多段分层注水井逐级解封封隔器研制与应用[J].大庆石油地质与开发,2016,35(4):113-116.
Li Dan.Development and application of the step-by-step releasable packer in the staged layered water injector[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2016,35(4):113-116.
- [2] 杜庆龙.多层非均质砂岩油田小层动用状况快速定量评价方法[J].大庆石油地质与开发,2016,35(4):43-48.
Du Qinglong.Quick-quantitative evaluating method of the sublayer developed conditions in the multilayered heterogeneous sandstone oilfield [J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2016,35(4):43-48.
- [3] 高大鹏,叶继根,胡云鹏,等.基于洛伦兹曲线模型评价精细分层注水效果[J].石油勘探与开发,2015,42(6):787-793.
Gao Dapeng, Ye Jigen, Hu Yunpeng, et al.Application of Lorenz-curve model to stratified water injection evaluation [J].Petroleum Exploration and Development,2015,42(6):787-793.
- [4] 冯其红,王相,王端平,等.水驱油藏均衡驱替开发效果论证[J].油气地质与采收率,2016,23(3):83-88.
Feng Qihong, Wang Xiang, Wang Duanping, et al.Theoretical analysis on the performance of equilibrium displacement in water flooding reservoir [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(3):83-88.
- [5] 杜庆龙,朱丽红.油水并分层动用状况研究新方法[J].石油勘探与开发,2004,31(5):96-98.
Du Qinglong, Zhu Lihong.A new approach to study layered producing performance of oil and water wells [J].Petroleum Exploration and Development,2004,31(5):96-98.
- [6] Sun Fuchao, Jia Deli, Yu Jiaqing, et al.Separate layer water injection for offshore directional wells [R].SPE 182243-MS,2016.
- [7] 高辉,樊志强,文开丰,等.基于多参数评价的致密砂岩气藏成岩相定量划分——以鄂尔多斯盆地神木气田山1段储层为例[J].石油实验地质,2015,37(6):781-788.
Gao Hui, Fan Zhiqiang, Wen Kaifeng, et al.Quantitative classification of diagenetic facies in tight sandstone gas reservoirs based on multi-parameter evaluation: A case study of the first member of Shanxi Formation in the Shenmu Gas Field, Ordos Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(6):781-788.
- [8] 党胜国,冯鑫,闫建丽,等.夹层研究在水平井开发厚层底水油藏中的应用——以曹妃甸11-6油田 Massive 砂体为例[J].油气地质与采收率,2015,22(1):63-67.
Dang Shengguo, Feng Xin, Yan Jianli, et al.Interlayer research application in horizontal well development of thick bottom water reservoir—a case of massive sand in Caofeidian11-6 oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(1):63-67.
- [9] 苏彦春,贾晓飞,李云鹏,等.多层合采油藏层间动态干扰定量表征新技术[J].特种油气藏,2015,22(6):101-103.
Su Yanchun, Jia Xiaofei, Li Yunpeng, et al.New technology for quantitative characterization of interlayer dynamic interference in commingled producing oil reservoir [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2015,22(6):101-103.
- [10] 崔传智,盛倩,姜亦栋,等.高含水期多层油藏注水层段划分方法[J].断块油气田,2016,23(3):363-366.
Cui Chuazhi, Sheng Qian, Jiang Yidong, et al.Reasonable water injection interval dividing of multilayer producing block reservoir with high water cut [J].Fault-Block Oil & Gas Field,2016,23(3):363-366.
- [11] 杨双,李雯静,李楠,等.改进的极差最优分割法在专题数据分级中的应用[J].地理空间信息,2014,12(2):152-155.
Yang Shuang, Li Wenjing, Li Nan, et al.Application of improved poor optimal segmentation algorithm in thematic data classification [J].Geospatial Information,2014,12(2):152-155.
- [12] 惠钢,王友净,李佳鸿,等.中—高含水期低渗透储层优势渗流通道研究——以温米油田温西一区块三间房组储层为例[J].油气地质与采收率,2015,22(6):74-79.
Hui Gang, Wang Youjing, Li Jiahong, et al.Research on dominant flow path of low permeability reservoir in medium-high water cut period: A case study of the Sanjianfang Formation of Wenxi1 block in Wenmi oilfield [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(6):74-79.
- [13] 张建国.油气层渗流力学[M].2版.东营:中国石油大学出版社,2009:72-73.
Zhang Jianguo.Reservoir seepage mechanics [M].2nd ed.Dongying:China University of Petroleum Press,2009:72-73.
- [14] 耿正玲.特高含水期多层油藏纵向均衡驱替优化研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2013:66-68.
Geng Zhengling.The optimization research of vertical equilibrium displacement for multilayer reservoir in ultra-high water cut stage [D].Qingdao:China University of Petroleum (East China),2013:66-68.